

2019
São Carlos - SP



10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação
05 a 07 de agosto de 2019, São Carlos, SP, Brasil

DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTAS DE CORTE A BASE NbC-Ni

Laerte José Fernandes

Gilmar Ferreira Batalha

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Depto. De Mecatrônica e Sistemas de Engenharia Mecânico- Av. Prof. Mello Moraes, 2231, São Paulo- SP, CEP 05508-030
gilmar.batalha@poli.usp.br

Rodrigo Lima Stoeterau

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Depto. De Mecatrônica e Sistemas de Engenharia Mecânico- Av. Prof. Mello Moraes, 2231, São Paulo- SP, CEP 05508-030
Rodrigo.stoeterau@usp.br

Daniel Rodrigues

Brats Ind. e Com. de Prod. <et. Esp. Ltda. Av. Dr. Antonio João Abdalla, 200 - Centro, Cajamar - SP, CEP 07750-620
Daniel@brats.com.br

Resumo. NbC é um membro do grupo de materiais tribológicos de alta dureza e resistência ao desgaste. Essas características qualificam como um material de ferramenta de corte, onde a resistência ao desgaste é um dos principais requisitos. Com o objetivo de investigar a viabilidade da utilização do NbC com Ni como ligante, foram desenvolvidas três classes deste material. As amostras foram desenvolvidas alterando o percentual de peso de NbC e Ni e condições de sinterização. As amostras foram fabricadas na forma de ferramentas de corte. Elas foram classificadas em termos de sua macro/micro geometria. Devido às condições tribológicas severas observadas nas interfaces face/cavaco e cavaco/flanco da ferramenta, o teste comportamental de desgaste foi conduzido através de um processo de usinagem. Experimentos de usinagem sob diferentes parâmetros de corte foram realizados em peças de aço ANSI 4340 temperado e revenido. A progressão do desgaste do flanco foi o parâmetro de controle, através do MEV/EDS foram investigados a mecânica de desgaste. O principal mecanismo de desgaste observado foi a abrasão, seguida de adesão, não foram observados vestígios de tribooxidação e difusão. Os resultados permitiram concluir que a relação NbC/Ni tem forte influência sobre o desgaste, porém o parâmetro principal são condições de sinterização.

Palavras chave: Carboneto de Nióbio, níquel, metal duro, mecanismo de desgaste, metalurgia do pó, usinagem

1. INTRODUÇÃO

O NbC tem sido tradicionalmente utilizado como material de fase secundária em aços rápidos, ferramentas de metal duro e cermet. No entanto, seu potencial como principal fase dura em ferramentas de corte foi pouco explorado. A dureza do NbC é comparável à dos carbonetos de titânio, tungstênio, molibdênio e cromo. Sua alta dureza proporciona alta resistência ao desgaste, desejável para aplicações de ferramentas de corte. No entanto, sua baixa solubilidade e altas temperaturas de sinterização são dois pontos-chaves a serem superados. Melhorias nas técnicas de sinterização permitem a exploração de todo o seu potencial como material de ferramenta de corte. Os processos *hot pressing*, *high-frequency induction heated sintering* e *spark-plasma-sintering* (SPS) permitem obter carbonetos à base de NbC de alta qualidade.

O presente trabalho teve como objetivo comparar o desempenho de corte de três insertos alternativos baseados em NbC-Ni com diferentes combinações de carbonetos e condições de sinterização, em relação a uma ferramenta equivalente de carboneto de tungstênio. Para atingir este objetivo, dois tipos de insertos baseados em NbC-Ni foram desenvolvidos, e testes de usinagem foram realizados utilizando aço AISI 4340 temperado e revenido, com dureza de 35 ± 3 HRC, como material de teste. A progressão do desgaste do flanco foi usada como parâmetro de comparação para determinar o desempenho da resistência ao desgaste.

2. REQUISITOS DA FERRAMENTA DE CORTE E MATERIAIS DE FERRAMENTAS DE CORTE

As ferramentas de corte são submetidas a enorme esforço, alta temperatura, alta pressão de contato e diferentes condições de desgaste durante a formação de cavacos. Os principais requisitos desejáveis para materiais de ferramentas de corte são: Dureza e resistência à pressão; Resistência e resistência à flexão; força da borda; Força de ligação interna, para ferramentas de metal duro; alta resistência à temperatura; resistência à oxidação; Pequena propensão à difusão e adesão; resistência à abrasão; Comportamento de desgaste reproduzível.

Nenhum dos materiais de ferramentas existentes no mercado é capaz de atender a todos esses requisitos simultaneamente. O desenvolvimento de novos materiais de corte deve alcançar uma solução de compromisso entre dureza e tenacidade (Klocke, 2011; Trent e Wright, 2000).

2.1. Ferramentas de metal duro

Os metais duros correspondem a uma família de materiais compósitos fabricados pela metalurgia do pó. A principal fase dura é fornecida por um carboneto, que aumenta sua dureza, e por um ligante que confere a este material sua resistência e plasticidade (Thummler e Oberacker, 1993). Eles apareceram pela primeira vez em 1927, desenvolvidos pela Widia Co. como ferramentas de metal duro WC-Co. Estes foram utilizados principalmente para usinagem de ferro fundido devido à sua alta resistência ao desgaste (Klocke, 2011). Em seguida, seu uso foi estendido para a usinagem de materiais de cavacos longos, como aço e ligas de alumínio. A fim de melhorar alguns dos seus requisitos específicos e aumentar a tenacidade do carboneto, bem como resistência a alta temperatura, são adicionados carbonetos de segunda fase como TiC, TaC, MoC, NbC. O cobalto é o principal ligante de fase para os metais duros à base de carboneto de tungstênio. Isto é devido ao alto nível de solubilidade do WC em cobalto, e à boa molhabilidade do cobalto no WC (Klocke, 2011; Thummler e Oberacker, 1993; Smith, 2008).

2.2. Ferramentas de NbC-Ni

O NbC é usado como carboneto de fase secundária para aumentar a resistência ao desgaste, melhorando assim a dureza a quente e limitando o crescimento de grãos. No entanto, pesquisas recentes mostraram que o carboneto de nióbio tem importantes propriedades tribológicas, físicas e mecânicas para aplicações de materiais para ferramentas de corte. Na verdade, NbC pode ser usado em substituição ao carboneto de tungstênio, que tem sido usado por muito tempo nesta aplicação (Woydt, et al., 2016; Woydt, et al., 2014; Mohrbacher e Zhai, 2011).

Recentemente, especial atenção foi dada ao uso de nióbio para aplicações de ferramentas de corte. A utilização de carboneto de nióbio como a principal fase dura do substrato de ferramenta de corte tem estudos recentes (Woydt et al, 2016; Woydt et al, 2014; Uhlmann et al, 2018). Algumas das propriedades do carboneto de nióbio foram comparadas com as do carboneto de tungstênio, e o carboneto de nióbio mostrou algumas vantagens distintas sobre este material de corte bem estabelecido. No entanto, as propriedades mecânicas e particularmente tribológicas do NbC permanecem amplamente inexploradas. Em uma análise preliminar, as aplicações em ferramentas de corte NbC devem ser superiores a WC, pois a 1.225 °C NbC é quase insolúvel em Cr, Ni, Co ou Fe, enquanto WC é totalmente solúvel nas mesmas condições. A alta solubilidade do WC nesses metais é responsável pelo desgaste químico (difusão) do WC. Seu maior ponto de fusão e a formação tribo-oxidativa de óxido de nióbio (Nb₂O₅) na superfície da ferramenta, em combinação com baixa solubilidade de NbC em metais, levam a uma redução na tendência ao desgaste adesivo e difusão (Woydt, et al., 2016; Woydt, et al., 2014).

Além disso, o Nióbio atualmente tem um benefício muito importante em relação à sustentabilidade (meio ambiente). O óxido de nióbio (Nb₂O₅) e o carboneto de nióbio (NbC) não apresentam riscos nem notificações críticas no Programa REACH - Registro, Avaliação, Autorização e Restrição de Substâncias Químicas. O REACH é um regulamento da União Europeia que visa melhorar a proteção da saúde humana e do meio ambiente contra os riscos impostos pelos produtos químicos. Carboneto de nióbio não foi restringido por nenhuma classificação crítica até o momento. Por outro lado, composições usadas para obter pó WC-Co por processo de redução, como trióxido de tungstênio (WO₃) e tetróxido de tricobalto (Co₃O₄), receberam várias classificações e rótulos relatados devido à sua relação com toxicidade mutagênica, carcinogênica e toxicidade reprodutiva pelo REACH (Woydt, et al., 2016; Woydt, et al., 2014; Mohrbacher e Zhai, 2011; Franco et al., 2011).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Três ferramentas de corte com diferentes composições em percentual de peso de NbC, ligante e/ou condições de sinterização foram desenvolvidos. A Tab. 1 apresenta a composição, dureza e tenacidade à fratura. A Fig. 1 mostra a temperatura de aquecimento e a atmosfera durante a sinterização. Uma pastilha de WC-Co comercial foi usada como uma ferramenta de controle, para definir uma referência para desempenho e reprodutibilidade dos resultados, a composição (% em peso): 13% Ti + 11,4% Co + 2,4% Nb + 66,3% WC. Sua dureza medida foi de 16,70 ± 0,05 GPa e a tenacidade à fratura K_{IC}: 10,3 ± 0,1 MPa.m^{1/2}. A evolução do desgaste do flanco foi selecionada como parâmetro de controle para avaliar o desempenho das ferramentas de corte desenvolvidas.

Tabela 1. Composição, dureza e tenacidade a fratura para as ferramentas de corte a base de NbC-Ni

Tipo	Composição (%p)	Dureza HV ₃₀ (GPa)	Tenacidade à Fratura K _{IC} (Mpa.m ^{1/2})
959	12%Ni+12%WC+14%TiC+ 62%NbC	14,43 ± 0,32	9,00 ± 0,30
965	12%Ni+12%WC+14%TiC+ 62%NbC	12,80 ± 0,30	8,70 ± 0,40
967	10%Ni+12%WC+14%TiC+ 64%NbC	14,60 ± 0,40	8,90 ± 0,40

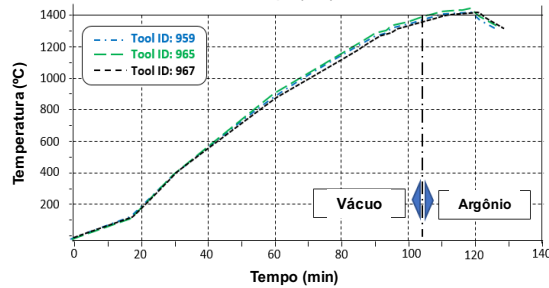


Figura 1. Temperatura de aquecimento e atmosfera durante a sinterização

Foram produzidos insertos de forma quadrada de acordo com a norma DIN ISO 1832 (Klocke, 2011). a geometria foi a SNMN 190608.

A evolução do desgaste do flanco foi realizada através do processo de torneamento. O desgaste do flanco foi medido em um período de tempo predefinido. O material de teste foi uma barra de aço ANSI 4340 de 90mm de diâmetro e 325mm de comprimento, temperado e revenido com dureza de 35 ± 3 HRC. Os resultados foram comparados com a ferramenta de controle WC-Co. A progressão do desgaste do flanco foi medida diretamente na máquina, com uma câmera CCD montada no suporte da ferramenta. Uma câmera CCD de 1.024×728 pixels de resolução, com uma ampliação de 200x foi usada. As imagens foram processadas usando o software dedicado.

Experiências preliminares foram conduzidas para estabelecer a faixa ótima de parâmetros de corte para o teste de desgaste. Os parâmetros preliminares foram: $V_{c1} = 160$ m/min, $V_{c2} = 200$ m/min, $V_{c3} = 250$ m/min, com avanço $f = 0,10$ mm/rot e profundidade de corte constante $a_p = 1,5$ mm, com lubrificação. Óleo vegetal miscível com água, à base de óleo de éster, livre de cloro, boro, formaldeído e zinco, com concentração de 10% e pH 9, foi usado como fluido de corte (Vasco, 2018). O melhor desempenho foi obtido com $V_c = 160$ m/min, sendo esta a velocidade definida para a realização deste estudo. Uma marca de desgaste de flanco $VB_B = 0,3$ mm foi definida como o parâmetro de vida útil da ferramenta. Os experimentos foram realizados utilizando um torno CNC com uma velocidade máxima de 4.000 rpm e 18,5 kW de potência. Os números de repetições por inserto foram de cinco testes.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com base nos resultados experimentais, obteve-se um comportamento médio para cada ferramenta de corte, sendo a relação a vida útil da aresta de corte em função do desgaste do flanco.

Depois de obter a vida útil média de cada ferramenta de corte, foi possível comparar as ferramentas NbC-Ni desenvolvidas, conforme pode ser observado na Fig. 2, que mostra o desgaste do flanco (VB_B) versus o tempo de corte. A Fig. 2 também apresenta a dispersão de tempo para o desgaste de flanco (barras de erros) para um $VB_B = 0,3$ mm que foi adotado como fim de vida da aresta de corte.

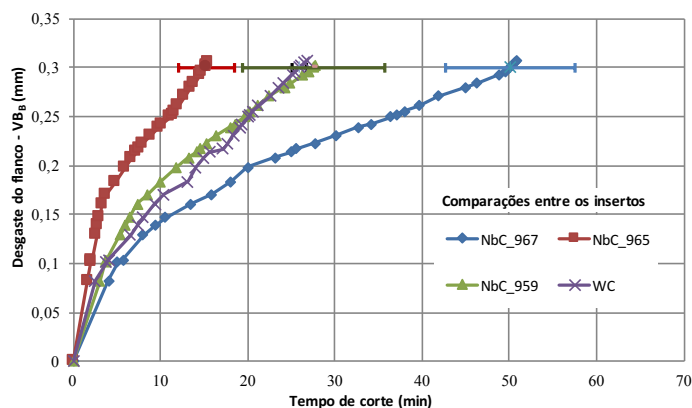


Figura 2. Desgaste do flanco da aresta (VB_B) x tempo de corte

O desenvolvimento das ferramentas foi realizado passo a passo, com resultados para cada ferramenta desenvolvida testada e analisada, a fim de propor mudanças para o desenvolvimento da próxima ferramenta. As mudanças realizadas foram focadas no processo de sinterização (temperatura, temperatura de aquecimento e tempo de patamar de sinterização), bem como a porcentagem de peso do ligante e do carboneto de nióbio.

A diferença entre os insertos NbC-Ni_959 e 965 esta no processo de sinterização, mais precisamente no tempo de patamar, sendo que no NbC-Ni_959 este tempo foi inferior ao da 965, o que causou um aumento sensível de sua dureza e um pequeno aumento da tenacidade em relação a NbC-Ni_965.

A última ferramenta desenvolvida nesta etapa foi a NbC-Ni_967, para a qual o teor de ligante foi reduzido para 10% (Ni), porém aumentando o NbC, respectivamente, para 64%. O processo de sinterização também teve seu tempo de patamar de sinterização ajustado. Os resultados das propriedades mecânicas foram dureza 14,6GPa e K_{IC} de 8,9 MPa.m^{1/2}. Em relação ao desempenho de usinagem, a ferramenta de corte NbC-Ni_967 ultrapassou em média 88,1% os valores da última ferramenta (NbC Ni_959).

A segunda etapa da análise foi comparar o desempenho das ferramentas de corte baseadas em NbC-Ni com a ferramenta de corte WC, usando o desempenho médio inicialmente obtido, que podem ser observados também nas Fig. 2.

As ferramentas NbC-Ni_965 tiveram um desempenho médio inferior à ferramenta WC. O NbC-Ni_959 teve um desempenho médio semelhante ao da ferramenta WC, porém com uma dispersão bem maior, como pode ser observado na Fig. 2. As ferramentas de corte NbC-Ni_967 foram desenvolvidas após a análise dos dados de todos os testes anteriores. Isso permitiu o ajuste do processo de sinterização e possibilitou a alteração de sua composição química, reduzindo o aglomerante e aumentando o teor de carboneto de nióbio. Estas mudanças melhoraram significativamente o desempenho desta ferramenta, em comparação com a ferramenta de corte WC, obtendo um desempenho superior médio de 88,8%, levando-se em conta a dispersão o desempenho foi superior de 65,5% a 110,6%.

A análise de aderência e abrasão das arestas de corte foram realizadas utilizando MEV e EDS. Esta análise também foi suportada com microscopia óptica. Por meio dessas análises, foi possível concluir que os mecanismos de desgaste na ferramenta baseados em NbC-Ni foram abrasão e aderência. As Fig. 3a, 3b e Fig. 4 mostram um exemplo dos mecanismos de desgaste que ocorreram nas ferramentas de NbC-Ni (NbC-Ni_967).

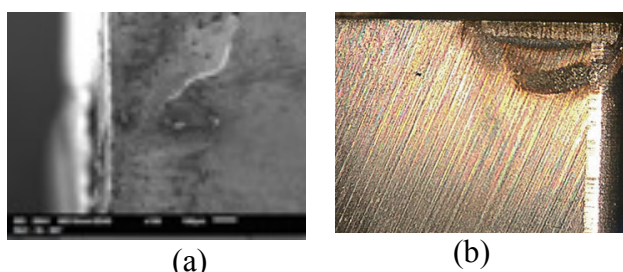


Figura 3. Mecanismos de desgastes: (a) MEV (b) Microscópio optico

Zona	Quantificação do resultado – Percentagem em Massa (%)								
	Fe	Si	Ti	Cr	Mn	Co	Ni	Nb	W
001	13.9		12.7		3.5		3.0	57.8	9.2
002	10.0	4,3	10.9	0.4	6.3		1.3	58.1	8.7
003	4.4	8,0	10.3	0.5	6.9		2.0	58.9	9.1
004	1.8		13.6			1.3	12.4	58.8	12.1
005			13.5			1.4	14.1	58.8	12.2

Figura 4. Mecanismo de desgaste por adesão – EDS

5. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos com as ferramentas de corte NbC-Ni mostram uma direção correta em seu desenvolvimento. Inicialmente, tentou-se desenvolver ferramentas NbC-Ni com a mesma dureza e tenacidade à fratura em comparação com as ferramentas da WC-Co. A crença era de que, se suas propriedades mecânicas fossem semelhantes às da WC-Co, as ferramentas NbC-Ni teriam um desempenho de vida similar ou até superior que o das ferramentas WC-Co. Entretanto, testes realizados até o momento mostraram que as ferramentas NbC-Ni possuem propriedades diferentes da WC-Co, levando a um desempenho superior a esta. No entanto, existe a necessidade de estudar mais os mecanismos de desgaste durante o processo de usinagem. É necessário obter uma melhor compreensão da qualificação metalúrgica para a porosidade, uma ótima densificação durante o processo de sinterização e uma melhor compreensão do comportamento da deformação plástica. Todos esses tópicos de pesquisa procurarão entender por que as ferramentas NbC-Ni têm uma dispersão de sua vida útil média maior do que as ferramentas da WC-Co. Com estas novas análises os propósitos são de aumentar o desempenho da ferramenta a base de NbC e reduzir a dispersão da vida da aresta de corte

4. REFERÊNCIAS

Klocke, F., 2011. Manufacturing processes 1: cutting. Berlin: Springer.

- Trent, E., Wright P., 2000. Metal cutting. 4th ed. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Thummler F., Oberacker, R., 1993. Introduction to Powder Metallurgy. The Institute of Materials 1 Carlton House Terrace London, UK.
- Smith, G. T., 2008. Cutting tool technology: Industrial handbook. London: Springer.
- Woydt, M., Mohrbacher, H., Vleugels, J., Huang, S.G., 2016. Niobium carbide for wear protection - tailoring its properties by processing and stoichiometry. Metal Powder Report, V.1, n 4, p.265-272.
- Woydt, M., Mohrbacher, H., 2014. The tribological and mechanical properties of niobium carbides (NbC) bonded with cobalt or Fe3Al. Wear 321, p. 1-7
- Mohrbacher, H., Zhai, Q., 2011. Niobium alloying in grey cast iron for vehicle brake discs. in: Proc. of Materials Science & Technology Conference, October 16-20, Columbus, Ohio, ASM Int., p. 434-445.
- Uhlmann, U., Hinzmann, D., Kropidlowksi, K., Meier, P., Prasol, L., Woydt, M., 2018. Increased tool performance with niobium carbide based cutting materials in dry cylindrical turning (8th CIRP Conference on High Performance Cutting).
- Franco, E., Costa, C.E., Tsiapas, S.A., Gordo, E., 2015. Cermets based on FeAl-NbC from composite powders: Design of composition and processing. Int. Journal of Refractory Metals and Hard Materials 48, p. 324-332.
- Informação no http://www.cuttingfluids.com.mx/es/wpcontent/uploads/2014/09/Vasco_7000.pdf. acessado em 18 de Abril 2018.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Development of NbC-Ni Basic Cutting Tools

Laerte José Fernandes

Gilmar Ferreira Batalha

Department of Mechatronics and Mechanical Systems Engineering, Polytechnic School of Engineering, University of Sao Paulo - Av. Prof. Mello Moraes, 2231, São Paulo- SP, CEP 05508-030

gilmar.batalha@poli.usp.br

Rodrigo Lima Stoeterau

Department of Mechatronics and Mechanical Systems Engineering, Polytechnic School of Engineering, University of Sao Paulo - Av. Prof. Mello Moraes, 2231, São Paulo- SP, CEP 05508-030

Rodrigo.stoeterau@usp.br

Daniel Rodrigues

Brats Ind. e Com. de Prod. <et. Esp. Ltda. Av. Dr. Antonio João Abdalla, 200 - Centro, Cajamar - SP, CEP 07750-620

Daniel@brats.com.br

Abstract. Niobium carbide is a group member of high-hardness and wear-resistance tribological materials. These characteristics qualify it as a cutting tool material, where wear resistance is one of the main requirements. With the objective of investigating the viability of using NbC – Ni binder cemented carbides as a high wear-resistance material, three grades samples were developed. Samples were developed at different ratios of NbC carbide/ Ni binder, and sintering conditions. Moreover, samples were manufactured in the form of insert tools with square shape. The inserts were classified in terms of its macro geometry, surface, and cutting-edge micro geometry. Due to the severe tribological conditions observed at the tool chip/rake face and chip/flank interfaces, testing of the wear behavior was conducted by selection of a machining process. Machining experiments under different cutting parameters were carried out on tempered ANSI 4340 steel workpieces. Flank wear progression was the control parameter, and the wear analysis conducted using SEM/EDS microscopy to investigate wear mechanics. The main wear mechanism observed was abrasion, followed by adhesion, and no traces of tribooxidation and diffusion were observed. The results led to the conclusion the ratio NbC carbide/Ni binder has a strong influence over the wear, yet the main parameter correspond to the sintering conditions.

Keywords: Niobium carbide, nickel, cemented carbides, wear, powder metallurgy, machining

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.